干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

2005—2020年新疆雷电灾害特征分析

刘兆旭[1,2,3,4]， 刘 晶[1,2,4]， 范子昂[3]

（1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002；2. 中亚大气科学研究中心，新疆 乌鲁木齐 830002；3. 新疆维吾尔自治区防雷减灾中心，新疆 乌鲁木齐 830002；4. 新疆塔克拉玛干沙漠气象国家野外科学观测研究站/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学试验基地/新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：利用2005—2020年新疆雷电灾害统计数据及2013—2020年新疆闪电定位监测数据，从雷电灾害发生的行业分布、人员伤亡、经济损失等角度，对新疆2005—2020年雷电灾害特征进行了分析。结果表明：(1) 2005—2020年新疆共发生雷电灾害事件154次，导致82人伤亡，近16 a雷电灾害事件呈逐年递减趋势，其中月分布高发期在4—8月，这与新疆的雷电月活动规律一致。(2) 雷电灾害空间分布特征和地域有很大的相关性，雷电灾害主要集中在北疆阿勒泰地区、塔城东南部地区以及伊犁哈萨克自治州直属县市一线，而南疆的雷电灾害数量基本上很少。(3) 雷电灾害事件主要发生在农村，占雷电灾害事件总数的62.3%。雷电灾害事件造成的行业受损比例由多到少依次是民用电子设备、工厂设备、电力设备和建筑物。本研究结果可为新疆防雷减灾工作提供重要的理论依据。

关 键 词：雷电灾害事件；时空分布；地闪活动；新疆
文章编号：

雷电是发生于大气中的一种瞬时高电压、大电流、强电磁辐射灾害性天气现象[1]。雷电灾害泛指雷击或雷电电磁脉冲入侵和影响造成人员伤亡或物体受损，其部分或全部功能丧失，酿成不良的社会和经济后果的事件[2]，是联合国“国际减灾十年”公布的最严重的10种自然灾害之一[3]，对安全生产常造成较大的影响，其引发的灾难事件时有发生。全球每年因雷击导致的火灾、爆炸等事件频繁发生，对人民生命财产安全和社会发展构成了严重威胁[4-7]。

不少学者针对雷电活动规律和雷电灾害的特征开展了深入的研究[8-10]，研究结果表明，1997—2006年我国雷电灾害造成的人员伤亡情况主要呈下降的趋势，雷击导致的人员伤亡事件主要发生在农村。中国雷灾多发生于东部沿海地区和南部地区。在此基础上，众多国内气象学者相继开展了研究，通过对广东省[11]、海南岛[12]、山东省[13]、河北省[14]、浙江省[15]等地区雷电灾害特征统计分析发现，6—8月是雷电灾害发生高峰期。此外，刘平英等[16]对雷电灾害与致灾因子、承灾体以及孕灾环境的相关性进行分析发现，云南地区活跃的地闪活动是导致雷电灾害的主要致灾因子，正地闪所占比例的季节变化特征可以作为判定雷电高发期开始及结束的一个重要标志。黄小彦等[17]发现湖北地区雷电灾害次数与雷暴日数月分布基本一致，均呈双峰型。除了雷电灾害区域性统计分析外，还有学者对各地区雷电灾害进行评估和区划分析[18-22]，进一步探究了雷灾事件的成因。

新疆位于欧亚大陆腹地，是典型的干旱区[23]，相对于同纬度的我国东部地区，新疆雷电发生频数

收稿日期：2021-11-23； **修订日期**：2022-01-20
基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目（IDM2021001，IDM2021005）；国家自然科学基金项目（41875023）；华云基金项目（HYJJ005）资助
作者简介：刘兆旭（1983-），男，本科，工程师，主要从事气象专业服务、平台设计、软件开发、雷电灾害预警方向研究. E-mail: 847592455@qq.com
通讯作者：刘晶（1991-），女，硕士，助理研究员，主要从事灾害性天气机理研究. E-mail: 994365768@qq.com

少、雷电灾害弱[24]，但受“三山夹两盆”独特地貌和地理位置影响，新疆夏季也常常出现强烈的对流天气，并伴随雷电活动，对新疆的经济建设和农牧民的生产生活造成了很大危害。随着新疆社会经济的快速发展，雷电造成的灾害影响越来越大。因此，研究并掌握新疆雷电灾害分布特征，寻求有效的防护措施，对于防雷减灾具有一定的实际意义。近年来，新疆气象学者针对新疆雷暴活动开展了许多研究[25-26]，相继给出了新疆各地区雷暴气候特征，指出新疆雷暴分布地域性强，雷暴日数由南向北逐渐增多，且东部多于西部。此外，也有研究[27]发现新疆地闪年变化呈单峰型分布，地闪高发期在6—8月，并对新疆雷电灾害风险进行了区划[28]。但是，上述研究尚未给出新疆雷电灾害时空分布特征，针对雷电灾害与地闪活动关系的相关研究也较少。因此，本文利用新疆2005—2020年雷电灾情实例，通过分析各市县雷电灾害损失时空分布、行业分布、人员伤亡和经济损失等的差异性，结合闪电定位监测数据频数、闪电密度和强度特征，探讨了新疆雷电灾害事件分布特征及其与地闪次数、地闪密度和强度等关系，以期对新疆雷电灾害有一个系统的认识，为新疆雷电灾害防御工作提供参考依据。

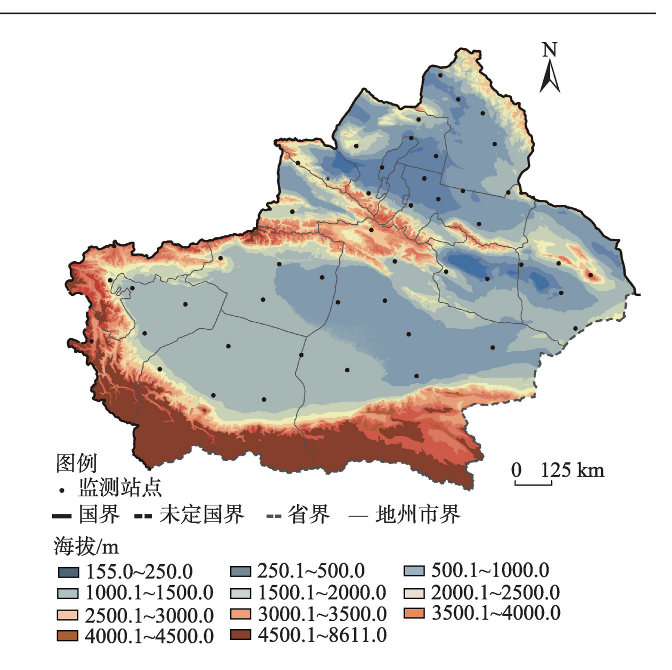
1 数据与方法

1.1 数据来源

雷电灾害数据来源于新疆气象局统计上报的2005—2020年各县市雷电灾害次数、伤亡人口和经济损失等数据。新疆地域较宽广，部分区域存在数据统计缺失或不完整的情况，本文的雷灾统计是不完全统计，对原始数据进行分类统计后，可确保雷电灾害数据的代表性。

地闪资料来源于新疆气象局LD-Ⅱ型闪电定位仪监测的2013—2020年逐日地闪数据。新疆地闪定位监测网于2011年安装完成，共布设了49个监测站点（图1），地闪定位系统工作范围大，探测范围可覆盖新疆全境。选取2013—2020年4—10月新疆地闪数据，采用数理统计方法分析新疆地闪活动特征。为减少闪电资料的误差对整体数据的干扰，从原始数据中剔除境外地闪数据和小幅值电流数据（地闪强度为-2~2 kA）[29]。

新疆各地市人口数和区域面积来自《2018年新疆统计年鉴》[30]。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1569号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 新疆地闪定位监测网测站分布

Fig. 1 Distribution of stations in Xinjiang ground lightning location system

1.2 研究方法

本文选用生命易损模数表征雷灾承灾体的脆弱性因素，生命易损模数为平均1 km²以上的人数[31]，单位为10^4人·km^{-2}。

为了研究新疆雷电灾害事件与新疆地闪活动的关系，本文利用逐日地闪数据计算得到地闪次数、地闪密度和地闪强度，分析其与雷电灾害事件次数在空间分布上的相关性。

地闪密度：利用逐日地闪数据，分别统计出新疆各地区年平均地闪次数，再按0.05°×0.05°经纬网格，用统计范围内各地区年平均地闪次数除以相应地区面积，得到年平均地闪密度（10^{-2}次·km^{-2}·a^{-1}）。

地闪强度：将地闪强度（$0<I\leq 200$ kA）分为6段（表1），分别统计各地闪强度区段内正、负地闪频数。

2 雷电灾害特征分析

2.1 雷电灾害概况

通过统计分析2005—2020年新疆雷电灾害事

表1 地闪强度区段

Tab. 1 Interval segment of ground lighting intensity

地闪强度(I)/kA					
$0<I\leq 20$	$20<I\leq 40$	$40<I\leq 60$	$60<I\leq 80$	$80<I\leq 100$	$100<I\leq 200$

件(表2)发现,近16 a新疆共上报雷电灾害事件154次,其中人员伤亡总数82人(死亡44人,受伤38人),新疆平均每年发生9.6次雷电灾害事件,平均每年雷击死亡2.8人,雷击受伤2.6人。2005—2020年雷击导致人畜伤亡事件63次,民用电子设备损坏40次,工厂设备损坏21次,建(构)筑物和农村屋、牧舍损坏8次,电力设备损坏17次;直接经济损失1071.5×10⁴元,间接经济损失53.7×10⁴元,总经济损失共计1125.2×10⁴元。新疆城市雷电灾害主要是造成电子设备损坏,农村雷电灾害则主要造成人畜伤亡。1993—1999年英国平均每年每100×10⁴人中就有0.05人死于雷击[8]。以《2018年新疆统计年鉴》中2017年末新疆人口总数2408×10⁴人计算,新疆每年每100×10⁴人中有0.09人死于雷击,是英国的1.8倍。新疆雷击人员伤亡比率为0.95:1,基本与全国数据持平[9]。新疆雷击人员伤亡比率比较低,考虑存在比较偏远地区的漏报和少报的可能。

2.2 雷电灾害事件时空分布特征

2.2.1 年变化特征 2005—2020年新疆雷电灾害事件的总数为154次,通过分析新疆雷电灾害事件年变化特征(图2)发现,雷电灾害灾事件总体呈现逐年减少的趋势。雷电灾害事件最多的年份为2005年(31次,占雷电灾害事件总数的20.1%);最少的年份为2016年和2020年(各1次,各占雷电灾害事件总数的0.6%不到)。2005—2007年雷电灾害事件比较多,是因为雷电灾害对人们社会生活的影响越来越大,电子设备在人们日常生活中更加广泛的应用,但雷电防护能力并没有加强,因而雷击损失的风险也在增加。近16 a平均每年雷电灾害9.6次,2013年以后,雷电灾害事件呈明显下降趋势,2016年和2020年都只有1次雷电灾害事件,出现这种趋势的主要原因可能是防雷减灾知识的普及和防雷意识的提高。

2.2.2 月变化特征 2005—2020年新疆雷电灾害事件均发生在3—9月,1、2、11、12月没有发生雷电灾害事件;雷电灾害事件发生高发期在4—8月(共发生150次),占雷电灾害事件总数的97.4%;3月和9月发生雷电灾害事件次数较少,共占雷电灾害事件总数的2.6%(图3);6月发生雷电灾害事件次数最多(共61次),占雷电灾害事件总数的39.6%。综合分析发现,新疆发生雷电灾害事件的季节性比较明显,主要集中在夏季。这与新疆地形复杂、地域辽阔、自然环境多样[22]有很大的关系。

2.2.3 空间分布特征 新疆地处欧亚大陆腹地,以天山山脉为中轴,把新疆分成南疆和北疆2个气候差异明显的地区。复杂的地形、人口分布和经济等

表2 2005—2020年新疆雷电灾害事件统计

Tab. 2 Statistics of lightning disaster events in Xinjiang from 2005 to 2020

年份	雷电灾害事件总数/次	直接经济损失/10⁴元	总经济损失/10⁴元	人员伤亡总数/人	死亡人数/人	受伤人数/人
2005	31	49.1	49.1	13	7	6
2006	14	14.8	39.0	7	5	2
2007	20	77.7	88.2	12	8	4
2008	6	0.2	0.2	4	3	1
2009	6	49.0	49.0	4	2	2
2010	11	78.0	78.0	16	3	13
2011	14	444.4	453.4	4	2	2
2012	17	46.8	46.8	14	7	7
2013	7	73.1	73.1	1	1	0
2014	6	68.5	68.5	4	3	1
2015	6	14.2	14.2	2	2	0
2016	1	0.0	0.0	1	1	0
2017	3	103.0	103.0	0	0	0
2018	2	2.7	2.7	0	0	0
2019	9	50.0	60.0	0	0	0
2020	1	0.0	0.0	0	0	0
总计	154	1071.5	1125.2	82	44	38

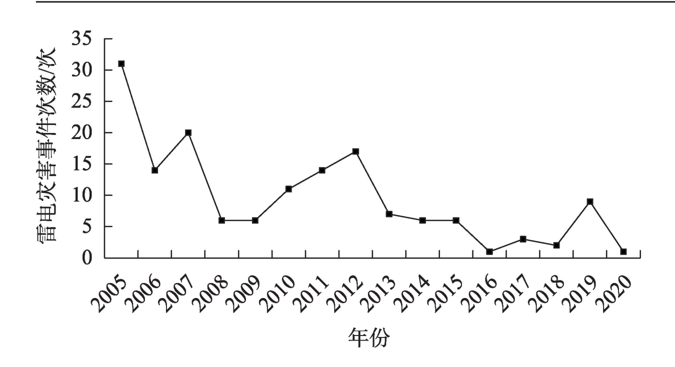


图2　新疆雷电灾害事件年变化

Fig. 2　Annual variation of lightning disaster events in Xinjiang

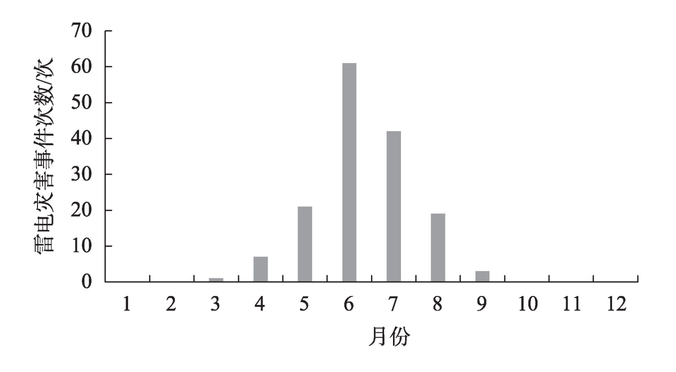


图3　新疆雷电灾害事件次数月变化

Fig. 3　Monthly variation of lightning disaster events in Xinjiang

情况，使雷电灾害事件分布有很大差异。2005—2020年共发生了154次雷电灾害事件（表3），其中发生次数最多的在克拉玛依市（7次），占雷电灾害事件总数的4.5%；排在第二位的为阿勒泰市和富蕴县，各发生6次雷电灾害事件，占雷电灾害事件总数的7.8%；排在第三位的为福海县、和布克赛尔蒙古自治县、青河县和昭苏县，各发生了5次雷电灾害事件，占全疆雷电灾害事件总数的13.0%；和田地区和巴音郭楞蒙古自治州南部沙漠地区发生雷电灾害事件最少，和田地区发生雷电灾害事件3次，而沙漠地区未发生雷电灾害事件。由此可见，雷电灾害事件主要集中在阿勒泰地区、塔城东南部地区以及伊犁哈萨克自治州直属县市一线，而南疆基本上很少，这可能是由于地域差异造成的。北疆气温低，降水多，闪电也多，由于沙漠的阻挡，南疆干燥，空气湿度低，云雨少，故而闪电也比较少。

2.3　雷电灾害事件损失时空分布特征

2005—2020年新疆雷电灾害事件造成的经济损失共计1125.2×10⁴元（图4）。近16 a，平均每年经济损失70.3×10⁴元。特别是2011年，经济损失达453.4×10⁴元，占经济损失总量的40.3%，是年均经济损失的6.4倍，但2011年雷电灾害事件次数并没有很多，主要原因是2011年5月22日乌苏市遭受了罕见的雷电灾害，此次雷电灾害的损失高达100×10⁴元。2007、2010、2011、2013年和2017年的经济损失也均超过了年均值。2016年和2020年雷电灾害事件经济损失最小，均为0，相应的雷电灾害事件次数也最少。

从各地州雷电灾害事件造成的经济损失情况分析发现（图5），昌吉回族自治州经济损失排在第一位，为386.8×10⁴元，占经济损失总量的34.4%；塔城地区排在第二位，经济损失为134.3×10⁴元，占经济损失总量的11.9%。和田地区、喀什地区和吐鲁番市经济损失基本较轻，3个地区经济损失总和为7.7×10⁴元，占总经济损失的0.7%。通过分析发现，经济损失严重的地区，雷电灾害事件次数并不是位于前列，这可能是由于单次的雷电灾害事件造成了重大经济损失，或未上报灾情，还与是否安装防雷装置、经济发展、雷暴活动的水平相关。

2.4　雷电灾害事件行业损失特征

依据《雷电灾情统计规范》（QX/T191—2013），结合新疆各地市实际情况，将2005—2020年遭受雷击的受损行业分为农林牧业、制造业、电力、通讯业、交通运输业、信息传输业、居民服务业、金融业和其他（包含教育、水利、公共管理和服务）行业共8类（图6），受损行业中，电力、通讯业和其他行业遭受雷击次数最多，占造成行业受损雷电灾害事件总数的21.2%和20.0%；制造业、农林牧业、居民服务业遭受雷击次数次之，分别占造成行业受损雷电灾害事件总数的16.5%、17.6%和16.5%。交通运输业、信息传输业和金融业遭受雷击次数较少，共占造成行业受损雷电灾害事件总数的8.2%。雷电灾害事件造成各行业经济损失的原因主要有两方面：一方面是由于很多行业设备都暴露在室外，他们的防护系统由直击雷防护装置、电涌保护装置、接地系统等多个子系统构成，一旦发生损坏，遭受雷击的风险也在增加，室外人员有可能遭受直击雷；有些建（构）筑物并没有安装避雷装置或者安装不规范，雷击发生时，也会遭受损失。另一方面是现代智能设备在民用电子设备中大量使用，但是人们防雷意识还没有很大的提高，也会增加雷击的风险。

表3　2005—2020年新疆雷电灾害事件次数、伤亡人数和经济损失统计

Tab. 3　Statistics of lighting disaster events, casualties and economic losses in Xinjiang from 2005 to 2020

地区	县(市)	雷电灾害次数/次	伤亡人数/人	受伤人数/人	死亡人数/人	经济损失/10^4元	地区	县(市)	雷电灾害次数/次	伤亡人数/人	受伤人数/人	死亡人数/人	经济损失/10^4元
伊犁哈萨克自治州直属县市	察布查尔县	3	1	0	1	2.6	阿勒泰地区	阿勒泰市	6	2	1	1	30.3
	巩留县	3	3	2	1	14.0		布尔津县	3	2	0	2	8.4
	霍城县	4	1	0	1	7.0		福海县	5	1	1	0	8.6
	尼勒克县	3	4	2	2	2.5		富蕴县	6	2	1	1	14.1
	新源县	3	0	0	0	22.6		哈巴河县	1	0	0	0	0.0
	伊宁县	1	1	0	1	0.0		吉木乃县	1	1	0	1	35.6
	昭苏县	5	9	6	3	3.0		青河县	5	1	0	1	25.7
巴音郭楞蒙古自治州	和静县	2	3	1	2	0.0	克孜勒苏柯尔克孜自治州	阿合奇县	2	8	7	1	4.0
	和硕县	1	1	0	1	0.0		阿克陶县	1	0	0	0	20.0
	库尔勒市	2	0	0	0	4.0		乌恰县	2	0	0	0	2.2
	尉犁县	1	3	2	1	0.0	博尔塔拉蒙古自治州	博乐市	3	2	1	1	36.0
	焉耆县	1	0	0	0	7.0		温泉县	1	0	0	0	4.0
塔城地区	额敏县	2	4	2	2	0.0	昌吉回族自治州	昌吉市	3	0	0	0	12.3
	和布克赛尔县	5	2	1	1	24.3		阜康市	2	0	0	0	53.0
	沙湾县	1	0	0	0	2.0		呼图壁县	1	0	0	0	1.0
	塔城市	2	1	0	1	0.7		吉木萨尔县	4	1	0	1	14.5
	托里县	4	2	1	1	4.3		玛纳斯县	1	0	0	0	300.0
	乌苏市	1	0	0	0	100.0		木垒县	2	4	3	1	0.0
	裕民县	3	1	0	1	3.0		奇台县	1	0	0	0	6.0
阿克苏地区	阿克苏市	4	2	0	2	0.0	吐鲁番市	鄯善县	1	0	0	0	0.3
	拜城县	2	1	0	1	0.0		托克逊县	1	1	0	1	0.0
	柯坪县	1	0	0	0	20.0	喀什地区	伽师县	1	0	0	0	0.0
	库车县	1	0	0	0	0.0		喀什市	2	2	1	1	0.8
	沙雅县	2	3	2	1	0.0		疏附县	1	0	0	0	6.0
	乌什县	2	1	0	1	1.5		英吉沙县	1	1	0	1	0.0
哈密市	巴里坤县	2	0	0	0	1.3	克拉玛依市	克拉玛依市	7	0	0	0	112.7
	伊州区	4	1	0	1	45.0	乌鲁木齐市	乌鲁木齐市	4	0	0	0	25.0
	伊吾县	2	1	0	1	59.3	石河子市	石河子市	4	3	1	2	80.0
和田地区	皮山县	3	6	3	3	0.6							

雷电灾害事件和环境也有很大的关系，对于雷电灾害事件的发生发展特性，孕灾环境敏感性主要与地形起伏、海拔高度、地表覆盖类型等因子相关[16]。新疆雷电灾害事件大多数发生在农村，占雷电灾害事件总数的62.3%(表4)。农村雷电灾害事件多发生在4—8月，造成的损失主要分为5个类型，人畜伤亡和电子设备损坏占农村雷电灾害事件总数的84.3%，这主要是因为4—8月正是农忙时节，田间地头、树下、牧场等地的地形较复杂，均没有避难场所，因而农民缺乏必要的防雷措施，受直击雷的可能性较大，一旦发生雷电灾害事件，就会造成伤亡。此外，农村的防雷意识也比较淡薄，农民干活基本在户外，遇到雷雨冰雹，不能有效采取雷电防御措施，导致雷电灾害伤亡事件时有发生。新疆城市雷电灾害事件中，电子设备和电力设备损失占城市雷电灾害事件总数的56.9%，主要因为电子设备的普及和人们雷电防护知识的匮乏；工厂设备损失占城市雷电灾害事件总数的36.2%，主要是因为防雷装置安装不规范、长时间没有进行防雷检测，导致防雷装置失去了保护作用。

2.5　雷电灾害事件人员伤亡特征

2.5.1　雷电灾害事件人员伤亡时间分布特征

2005—2020年新疆雷电灾害事件造成的人员伤亡呈明显下降趋势，年平均雷电灾害伤亡人数为5人

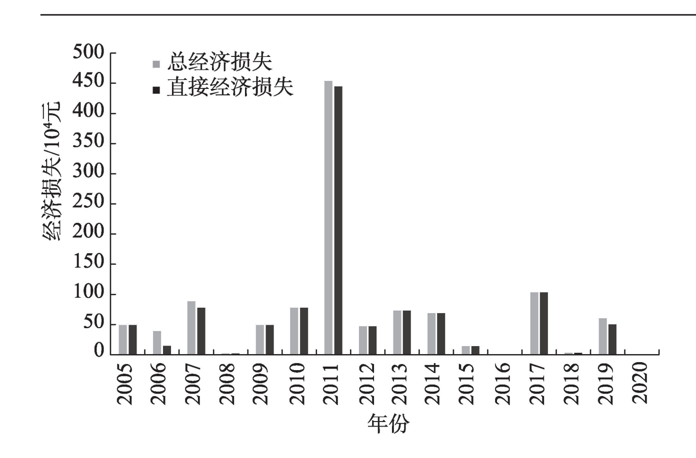


图4　新疆雷电灾害事件经济损失年变化

Fig. 4　Annual variation of economic loss caused by lightning disaster events in Xinjiang

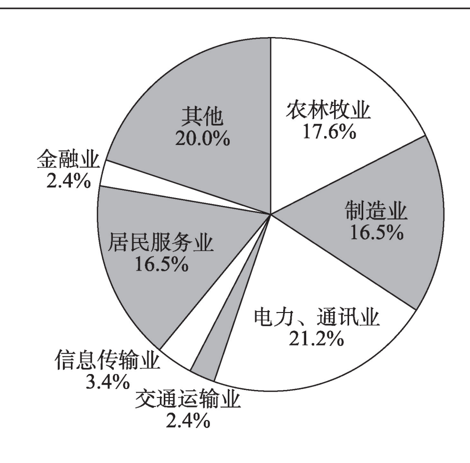
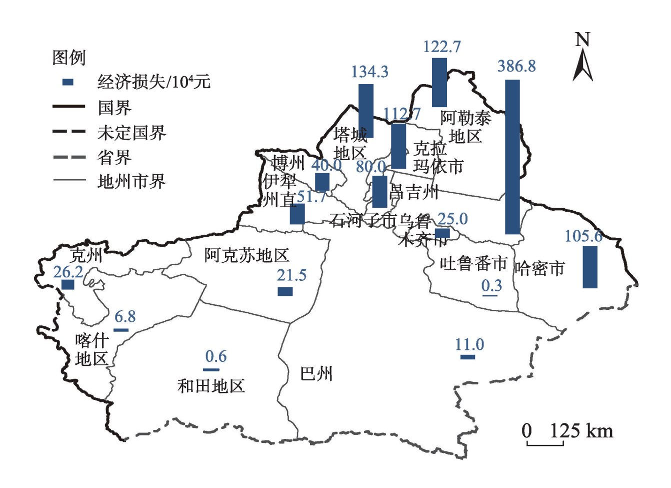


图6　遭受新疆雷电灾害事件受损的行业类型分布

Fig. 6　Distribution of industry types damaged by lightning disaster events in Xinjiang



注：博州是指博尔塔拉蒙古自治州；伊犁州直是指伊犁哈萨克自治州直属县市；克州是指克孜勒苏柯尔克孜自治州；昌吉州是指昌吉回族自治州；巴州是指巴音郭楞蒙古自治州。下同。

图5　新疆雷电灾害事件经济损失分布

Fig. 5　Distribution of economic losses caused by lightning disaster events in Xinjiang

(图7)。其中，2005—2012年雷电灾害事件和伤亡人数均处于高峰期，伤亡人数最多的年份是2010年(16人)，2005、2007年和2012年雷电灾害事件和伤亡人数也均处于较大值，分别有13人、12人和14人伤亡。2012年以后，呈逐年下降的趋势。到2017年以后没有发生过任何人员伤亡事件。

新疆雷电灾害事件造成人员伤亡数量存在一定的偶然性，2010年的雷电灾害事件虽只有11次，但2010年6月2日20时，新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州阿合奇县1次雷电造成了重大的雷电灾害事件，致使国营马场五队一户牧民家帐篷遭受雷击，造成1名7岁女孩死亡，另外有7人不同程度受伤。

2.5.2　雷电灾害事件人员伤亡空间分布特征　近16 a新疆雷电灾害事件共发生154次，伤亡82人，其中死亡44人，受伤38人，受伤人数和死亡人数之比为1.16:1。从雷电灾害事件造成的人员伤亡分布(图8)分析发现，伊犁哈萨克自治州直属县市人员伤亡人数排在第一位(19人)，占人员伤亡总数的23.2%；塔城地区和阿勒泰地区排在第二位和第三位，人员伤亡人数分别为10人和9人。而克拉玛依市、乌鲁木齐市为雷电灾害事件人员伤亡低发区，均未发生过雷电灾害伤亡事件。从统计可以看出，和田地区雷电灾害事件发生3次，但人员伤亡有6人，说明有可能雷电灾害事件存在着少报或者漏报。从以上分析来看，人员伤亡分布和雷电灾害事件分布并不是很一致，比如阿克苏地区的雷电灾害数量并不多，却造成7人伤亡。这种分布可能与地区的雷电活动强弱、地区人口分布、经济水平等因素相关。

表4　造成各行业损失的农村和城市雷电灾害事件次数统计

Tab. 4　Statistics on the number of lightning disaster events in rural and urban areas causing losses in various industries

	农村					城市			
	人畜伤亡	电子设备损坏	电力设备损坏	火灾	农村屋、牧舍损坏	电子设备损坏	电力设备损坏	工厂设备损坏	建筑物损坏
次数/次	63	18	6	5	4	22	11	21	4
占比/%	65.6	18.7	6.3	5.2	4.2	37.9	19.0	36.2	6.9

3 雷电灾害事件与相关因素分析

3.1 雷电灾害事件与地闪次数在时间分布上的相关性分析

2013—2020年新疆的地闪次数由4月开始增强，10月开始减弱。5—8月累计地闪次数占地闪总数的91.2%（图9）。其中，7月地闪次数达全年最大，占地闪总数的35.9%。2013—2015年新疆雷电灾害事件和造成的人员伤亡主要发生在4—8月，6—7月的雷电灾害事件最为严重，占雷电灾害事件总数的66.9%，对应6—7月地闪活动最为频繁，地闪次数也达到全年峰值，占地闪总数的68.1%。10月后地闪数基本为0。由图9可以看出，地闪次数和雷电灾害事件次数相吻合，两者相关系数达0.94，呈现了比较好的对应关系。

3.2 雷电灾害事件与地闪次数、地闪密度在空间分布上的相关性

3.2.1 地闪次数和密度空间分布特征 由新疆2013—2020年地闪次数的空间分布（图10）可知，阿勒泰地区、阿克苏地区、塔城地区、哈密市和克孜勒苏柯尔克孜自治州地闪活动较强，其中和布克赛尔县、福海县、托里县、富蕴县、布尔津县、吉木乃县、哈巴河县、阿图什市、拜城县、库车县、温宿县、哈密市、巴里坤县的地闪活动最为频繁，这些地区地闪次数占总地闪次数的46.1%。喀什地区、和田地区地闪次数最少，地闪活动很弱，其中喀什市和泽普县只发生了41次和107次地闪。

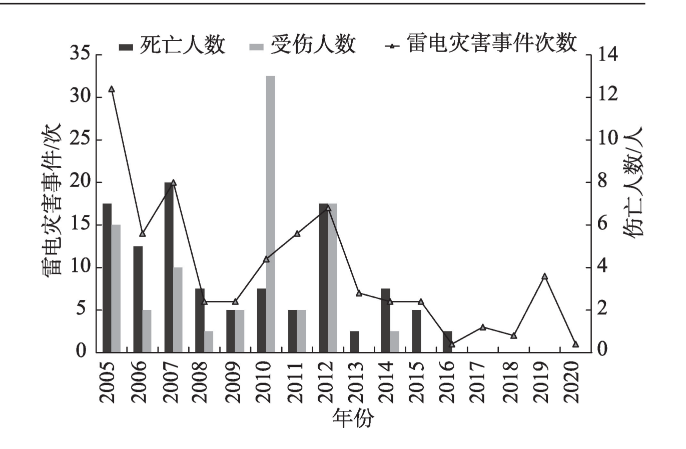


图7 新疆雷电灾害事件次数及雷击人员伤亡年变化

Fig. 7 Annual variations of lightning disaster events and casualties in Xinjiang

通过对新疆年平均地闪密度分布（图11）分析发现，2013—2020年新疆地闪密度空间呈带状和片

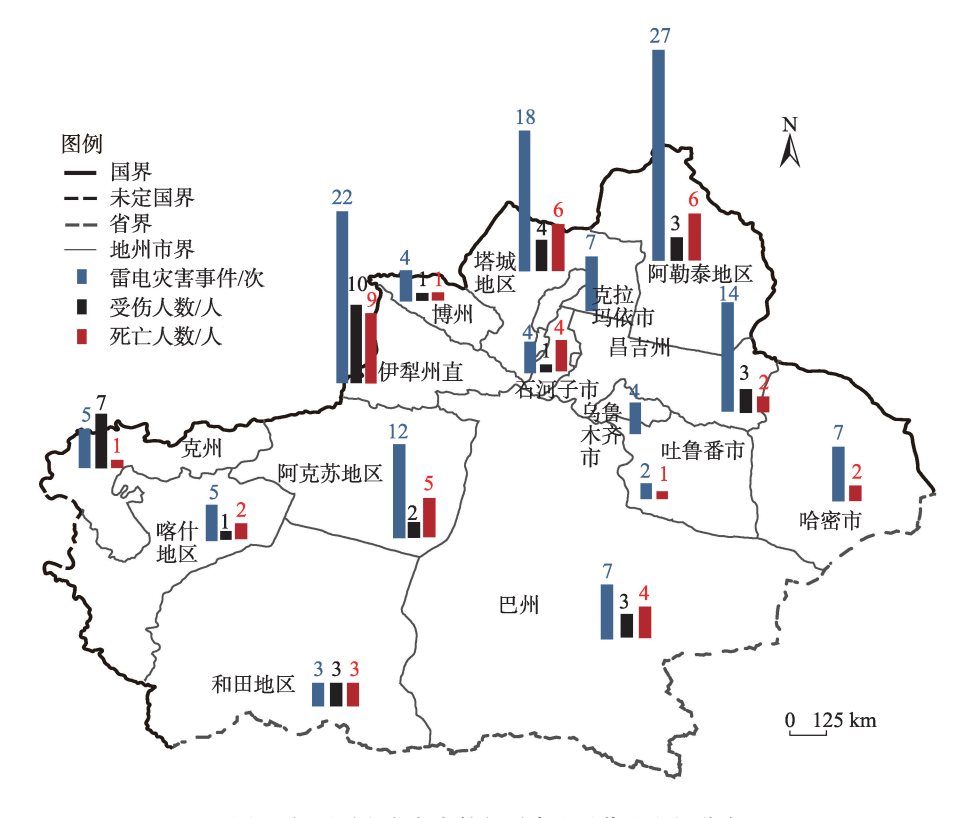


图8 新疆雷电灾害事件与雷击人员伤亡空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of lightning disaster events and casualties in Xinjiang

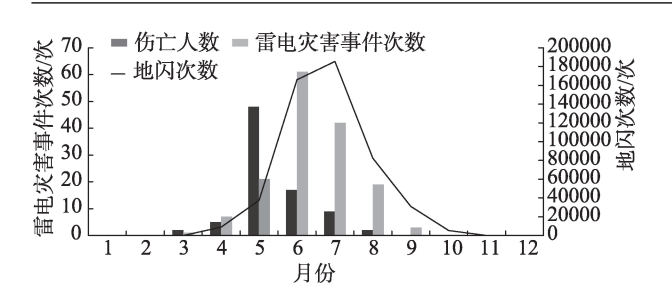


图9 雷电灾害事件次数、伤亡人数与地闪次数的月分布

Fig. 9 Monthly distributions of lightning disasters events, casualties, and ground lightning

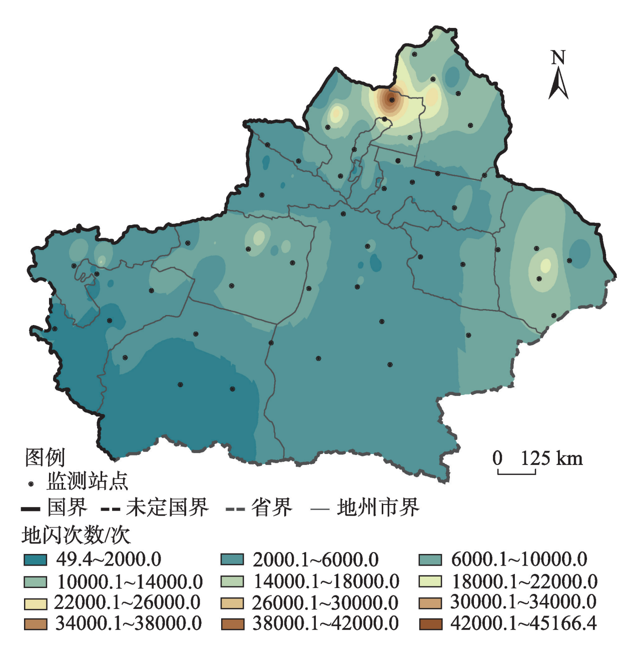


图10 新疆地闪次数空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of ground lightning frequency in Xinjiang

状分布，主要集中在阿勒泰地区、塔城地区、克拉玛依、伊犁哈萨克自治州直属县市、石河子市和乌鲁木齐市一线，而南疆地闪密度最小。由表5可知，2013—2020年新疆地闪密度最大区域为克拉玛依市，达718×10^{-2}次·km^{-2}·a^{-1}；其次是博尔塔拉蒙古自治州、乌鲁木齐市和石河子市，年平均地闪密度均超过50×10^{-2}次·km^{-2}·a^{-1}；喀什地区、吐鲁番市、哈密市的平均地闪密度都没有超过10×10^{-2}次·km^{-2}·a^{-1}；地闪活动比较弱；地闪密度最小值出现在和田地区和巴音郭楞蒙古自治州，只有1×10^{-2}次·km^{-2}·a^{-1}。

3.2.2 雷电灾害事件与地闪次数和密度在空间分布上的相关性分析 通过上文分析发现，在地闪次数和地闪密度较大的阿勒泰地区、塔城地区和喀什地区，雷电灾害事件相对较少，而克拉玛依市和伊犁

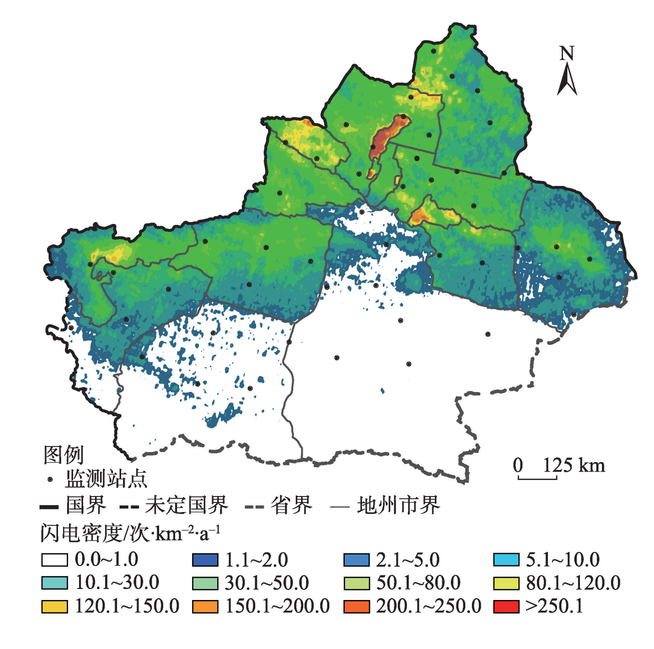


图11 新疆地闪密度空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of ground lightning density

哈萨克自治州直属县市地闪次数虽然较少，但由于克拉玛依市和伊犁哈萨克自治州直属县市地闪强度较大，这些地区雷电灾害事件次数也相对较多。通过计算分析发现新疆雷电灾害事件次数与地闪次数相关性达0.76，两者具有较好的对应关系（图

表5 各地州（市）地闪密度统计

Tab. 5 Statistics of ground lightning density in each prefecture (city)

地州（市）	地闪密度最大值 /10^{-2}次·km^{-2}·a^{-1}	地闪密度平均值 /10^{-2}次·km^{-2}·a^{-1}
阿勒泰地区	243	17
塔城地区	199	25
博尔塔拉蒙古自治州	303	58
伊犁哈萨克自治州直属县市	108	22
克拉玛依市	718	257
昌吉回族自治州	137	17
乌鲁木齐市	313	75
石河子市	258	92
哈密市	100	5
和田地区	7	1
巴音郭楞蒙古自治州	15	1
喀什地区	60	4
阿克苏地区	87	11
克孜勒苏柯尔克孜自治州	254	18
吐鲁番市	135	9

12)。新疆雷电灾害事件主要发生在阿勒泰地区、伊犁哈萨克自治州直属县市和塔城地区,其中雷电灾害事件造成的人员受伤主要分布在伊犁哈萨克自治州直属县市、克孜勒苏柯尔克孜自治州和塔城地区,分别造成10人、7人和4人受伤。雷电灾害事件造成的人员死亡主要分布在伊犁哈萨克自治州直属县市、阿勒泰地区、塔城地区和阿克苏地区,分别造成9人、6人、6人和5人死亡。

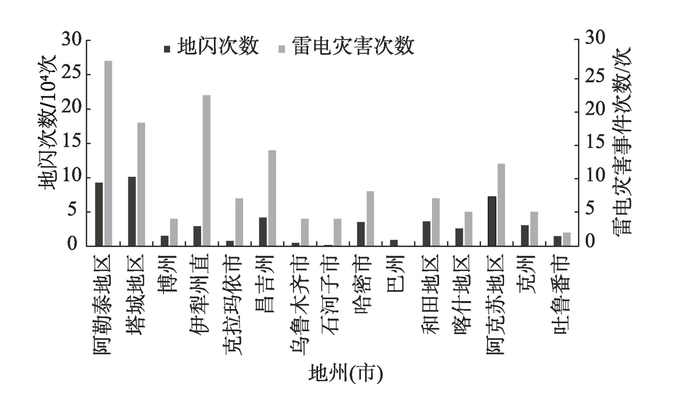


图12 新疆地闪次数和雷电灾害事件次数分布

Fig. 12 Distributions of lightning disaster event and ground lighting frequencies in Xinjiang

以地闪次数、生命易损模数、雷电灾害伤亡人数、地闪平均密度等为自变量,以雷电灾害次数为因变量,利用SPSS软件建立多元线性回归模型发现,地闪平均密度、地闪平均强度、生命易损模数的显著性水平检验结果大于0.05,因而最终确立多元线性回归模型为:

$$Y = 1.571 \times X1 + 0.768 \times X2 \quad (1)$$

式中:Y为雷电灾害次数;$X1$为地闪次数;$X2$为雷电灾害事件伤亡人数。

通过显著性分析发现,回归模型具有显著的统计学意义(F=8.734,P<0.005),地闪次数和雷电灾害事件伤亡人数对雷电灾害事件次数的影响具有统计学意义(P<0.05,表6)。结合上文分析,新疆雷电灾害事件次数一定程度上与地闪活动呈正相关关系,受各地区人口密度、城市建设、地形地貌等分布差异影响,新疆各地区的雷电灾害事件次数对地闪强度、生命易损模数等影响因子的响应有所不同。

3.3 雷电灾害与地闪强度的相关性分析

3.3.1 地闪强度分布特征 通过分析新疆地闪强度空间分布(图13)发现,地闪强度分布呈现由北向南增强的趋势,地闪强度最大值分别位于巴音郭楞蒙古自治州东南部山区和喀什南部山区,而这2个地区的地闪密度最大也没有超过5×10^{-2}次·km^{-2}·a^{-1},地闪次数也较少;地闪活动比较频繁的北疆偏北地区、南疆西部地区和东疆地区的地闪强度却很小,通过计算得出地闪强度和地闪密度、地闪强度和地闪次数的空间相关系数分别为−0.12和−0.44,由此可见,地闪强度空间分布和地闪次数、地闪密度的空间分布相关性比较弱,这与上文分析结果较为一致。

3.3.2 地闪正、负极性比例及逐月分布特征 2013—2020年新疆共发生正地闪71917次,负地闪447054次,负地闪次数占地闪总数的86.2%,正地闪次数占地闪总数的13.8%(图14)。其中,正地闪平均电流强度为59.24 kA(表7),电流强度以40~60 kA为极值向两侧迅速减少,负地闪的平均电流强度为33.57 kA(表8),电流强度以20~40 kA为极值向两侧迅速减少。进入新疆夏季汛期(6—8月)后,地闪活动主要以负地闪为主(图14),其中7月负地闪次数占地闪总数的87.7%。正地闪活动主要集中在4月和11月,正地闪次数分别占地闪总数的26.8%和24.6%。

表6 多元线性回归模型分析

Tab. 6 Analysis of multiple linear regression model

自变量	系数	标准误差	标准化系数	显著性水平(P)	共线性检验值(VIF)
常量	−4.691	4.658	–	0.340	–
地闪次数	1.571	0.456	0.644	0.007	1.840
生命易损模数	0.300	0.029	0.165	0.331	1.366
地闪平均密度	0.300	0.200	0.260	0.160	1.519
地闪平均强度	−0.127	0.219	−0.098	0.576	1.514
伤亡人数	0.780	0.257	0.501	0.015	1.486

注:–表示无数值。

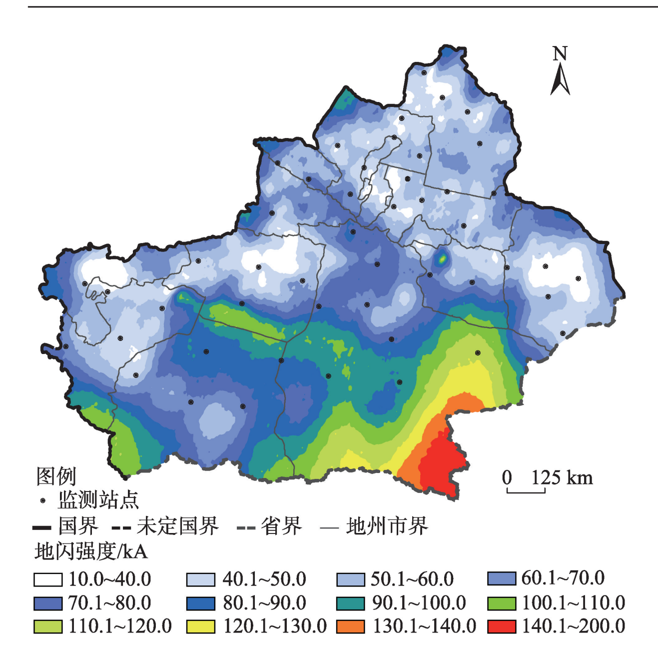


图13　新疆地闪强度空间分布

Fig. 13　Spatial distribution of ground lightning intensity in Xinjiang

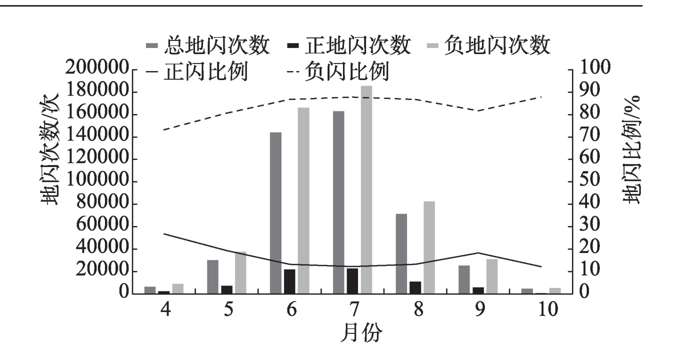


图14　新疆正、负地闪次数及其比例分布

Fig. 14　Frequency and proportion distributions of positive and negative ground lightning in Xinjiang

4　结 论

本文利用新疆2005—2020年雷电灾害数据，从雷电灾害事件时空分布、雷电灾害事件损失特征、人员伤亡特征、雷电灾害事件致灾因子等方面，统计了新疆雷电灾害事件的分布特征，并结合闪电定位监测数据地闪次数、地闪密度和强度特征进行了分析探讨，得出以下主要结论：

（1）2005—2020年新疆雷电灾害事件共计154次，主要集中在阿勒泰地区、塔城东南部地区以及伊犁哈萨克自治州直属县市一线，而南疆的雷电灾害事件基本上很少。雷电灾害事件主要发生在4—8月，造成的人员伤亡总数为82人，其中死亡44人，受伤38人。2013年以后，雷电灾害事件和人员伤亡数呈明显下降趋势，人员伤亡分布与地区雷电活动强弱、地区人口分布、经济水平等因素相关。

（2）2005—2020年新疆雷电灾害造成的经济损失共计1125.2×10⁴元，平均每年经济损失70.3×10⁴元。在新疆雷电灾害事件造成的行业损失中，人畜伤亡损失、民用电子设备损坏、工厂设备损坏排在前三位。新疆雷电灾害事件大多发生在农村，占了雷电灾害事件总数的62.3%。

（3）地闪活动是雷电灾害的主要致灾因子，新疆地闪活动主要集中在5—8月，占了地闪总数的91.2%，地闪活动主要集中在阿勒泰地区、塔城地区、阿克苏地区和哈密市，与雷电灾害事件空间分布呈现较好对应关系。新疆地闪密度空间呈带状和片状分布特征，地闪密度大值区主要集中在阿勒泰地区、塔城地区、克拉玛依市、伊犁哈萨克自治州直属县市、石河子市、乌鲁木齐市一线，南疆地闪密度最小。空间分布和地闪密度、地闪次数形成较好

表7　正地闪电流强度次数及其比例

Tab. 7　Frequency and proportion distributions of positive ground lightning intensity

地闪强度(*I*)/kA	0<*I*≤20	20<*I*≤40	40<*I*≤60	60<*I*≤80	80<*I*≤100	*I*>100
次数/次	3809	19692	20771	12234	6570	8453
比例/%	5.3	27.5	29.1	17.1	9.2	11.8

表8　负地闪电流强度比例分布

Tab. 8　Frequency and proportion distributions of negative ground lightning intensity

地闪强度(*I*)/kA	0<*I*≤20	20<*I*≤40	40<*I*≤60	60<*I*≤80	80<*I*≤100	*I*>100
次数/次	108698	235182	63668	18458	7669	11414
比例/%	24.4	52.8	14.3	4.2	1.7	2.6

对应关系，而地闪的强度和地闪的次数、地闪密度在空间分布上相关性较弱。

（4）新疆进入汛期之后，基本上以负地闪为主，正地闪的比例较少，4—5月和8月后正闪的比例呈现一个上升的趋势。正地闪的比例变化可以作为雷电灾害事件开端到结束的一个重要标志。

参考文献（References）

[1] 杨国锋. 闪电定位资料与多普勒雷达资料的综合分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005. [Yang Guofeng. Comprehensive analysis of lightning location data and Doppler radar data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Engineering, 2005.]

[2] 贺姗, 王学良, 余田野, 等. 中部五省2000—2008年雷电灾害时空分布特征分析[R]. 武汉: 湖北省防雷中心, 2012. [He Shan, Wang Xueliang, Yu Tianye, et al. Analysis on temporal and spatial distribution characteristics of lightning disasters in five central provinces from 2000 to 2008[R]. Wuhan: Hubei Lightning Protection Center, 2012.]

[3] 李家启, 李良福. 雷电灾害风险评估与控制[M]. 北京: 气象出版社, 2010: 80−192. [Li Jiaqi, Li Liangfu. Risk assessment and control of lightning disaster[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010: 80−192.]

[4] Mcintyre W F, Simpson C S, Redfearn D P, et al. The lightning heart: A case report and brief review of the cardiovascular complications of lightning injury[J]. Indian Pacing & Electrophysiology Journal, 2010, 10(9): 429−434.

[5] Ronald L H, Raul E L. Lightning casualties and damages in the United States from 1959 to 1994[J]. Journal of Climate, 2000, 13 (19): 3448−3464.

[6] Dlamini W M. Lightning fatalities in Swaziland: 2000—2007[J]. Natural Hazards, 2009, 50(1): 179−191.

[7] Elson D M. Deaths and injuries caused by lightning in the United Kingdom: Analyses of two databases[J]. Atmospheric Research, 2001, 56: 325−334.

[8] 马明, 吕伟涛, 张义军, 等. 1997—2006年我国雷电灾情特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 393−400. [Ma Ming, Lü Weitao, Zhang Yijun, et al. Characteristics of lightning disaster in China from 1997 to 2006[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(4): 393−400.]

[9] 胡先锋, 刘彦章, 肖稳安. 1998—2004年中国雷电灾害特征分析[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(3): 267−271. [Hu Xianfeng, Liu Yanzhang, Xiao Wen'an. Characteristics of lightning disasters in China from 1998 to 2004[J]. Research on Meteorology and Disaster Reduction, 2007, 30(3): 267−271.]

[10] 张敏锋, 冯霞. 我国雷暴天气的气候特征[J]. 热带气象学报, 1998, 14(2): 156−162. [Zhang Minfeng, Feng Xia. Climatic characteristics of thunderstorm weather in China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1998, 14(2): 156−162.]

[11] 张春燕, 黄延刚, 陈易昕. 2008—2012年广东省雷电灾害特征的分析[J]. 广东气象, 2015, 37(3): 63−65. [Zhang Chunyan, Huang Yangang, Chen Yixin. Analysis of lightning disaster characteristics in Guangdong Province from 2008 to 2012[J]. Guangdong Meteorology, 2015, 37(3): 63−65.]

[12] 高燚, 周方聪, 劳小青. 1999—2011年海南岛雷电灾害特征分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 253−262. [Gao Yan, Zhou Fangcong, Lao Xiaoqing. Characteristic analysis of lightning disaster in Hainan Island from 1999 to 2011[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 253−262.]

[13] 冯桂力, 陈文选, 刘诗军, 等. 山东地区闪电的特征分析[J]. 应用气象学报, 2002, 13(3): 347−335. [Feng Guili, Chen Wenxuan, Liu Shijun, et al. Preliminary analysis of lightning characteristics in Shandong[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(3): 347−335.]

[14] 彭相瑜, 陈笑娟, 陈小雷, 等. 河北省雷电灾害事件特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 100−104. [Peng Xiangyu, Chen Xiaojuan, Chen Xiaolei, et al. Characteristics of lightning disasters in Hebei Province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14 (4): 100−104.]

[15] 张祎, 李浩, 边学文. 2007—2013年浙江省雷电灾害特征统计分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(2): 139−143. [Zhang Wei, Li Hao, Bian Xuewen. Analysis of lightning disasters during 2007—2013 in Zhejiang Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2018, 41(2): 139−143.]

[16] 刘平英, 杨宗凯, 胡颖, 等. 2016年云南省雷电灾害分布与致灾因素相关性分析[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 130−135. [Liu Pingying, Yang Zongkai, Hu Ying, et al. Analysis on lightning disaster distribution characteristics and its corresponding causation of 2016 in Yunnan[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 130−135.]

[17] 黄小彦, 王学良, 李慧. 2000—2006年湖北省雷电灾害时空分布特征分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 73−77. [Huang Xiaoyan, Wang Xueliang, Li Hui. Temporal and spatial distribution of lightning disaster in Hubei Province during 2000—2006[J]. Torrential Rain and Disasters, 2008, 27(1): 73−77.]

[18] 邓春林, 季严飞, 刘刚. 基于雷电定位数据的区域雷击灾害风险评估方法探讨[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2010, 2(3): 230−235. [Deng Chunlin, Ji Yanfei, Liu Gang. Discussion on the risk assessment method for regional lightning disaster based on lightning location data[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 2 (3): 230−235.]

[19] 尹娜, 肖稳安. 区域雷灾易损性分析、评估及易损度区划[J]. 热带气象学报, 2005, 21(4): 441−449. [Yin Na, Xiao Wen'an. Regional vulnerability analysis evaluation and vulnerability zoning of lightning[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2005, 21(4): 441−449.]

[20] 郭虎, 熊亚军. 北京市雷电灾害易损性分析、评估及易损度区划[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 35−40. [Guo Hu, Xiong Yajun.

Vulnerability analysis, evaluation and vulnerability zoning of lightning disaster in Beijing[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(1): 35-40.]

[21] 张旭晖, 吴洪颜, 许祥, 等. 江苏省雷暴灾害脆弱性分析[J]. 气象科学, 2007, 27(5): 536-542. [Zhang Xuhui, Wu Hongyan, Xu Xiang, et al. An analysis on thunderstorm vulnerability in Jiangsu Province[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2007, 27(5): 536-542.]

[22] 王秀英, 王军, 罗少辉, 等. 基于模糊隶属度的雷电危险度等级评定[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 534-541. [Wang Xiuying, Wang Jun, Luo Shaohui, et al. Assessment of lightning hazard degree based on fuzzy membership[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 534-541.]

[23] 徐贵青, 魏文寿. 新疆气候变化及其对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 14-18. [Xu Guiqing, Wei Wenshou. Climate change of Xinjiang and its impact on eco-enviroment[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(1): 14-18.]

[24] 霍广勇, 江远安, 史红政, 等. 1961—2010年新疆雷暴时空分布及其变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1156-1164. [Huo Guangyong, Jiang Yuan'an, Shi Hongzheng, et al. Temporal and spatial distribution and variation characteristics of thunderstorms in Xinjiang from 1961 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1156-1164.]

[25] 赵斐, 葛新力. 阿勒泰地区雷暴的气候特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(3): 58-61. [Zhao Fei, Ge Xinli. Climatic features of thunderstorms in Altai Region[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2012, 6(3): 58-61.]

[26] 康伟, 王红, 霍文. 新疆北部沿天山经济带雷暴气候特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(5): 30-34. [Kang Wei, Wang Hong, Huo Wen. Climate characteristics of thunderstorms in the economic belt along Tianshan Mountains of northern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2011, 5(5): 30-34.

[27] 王延慧, 张建涛, 买买提艾力·买买提依明, 等. 2013—2016年新疆地闪活动特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(2): 43-49. [Wang Yanhui, Zhang Jiantao, Mamtimin Mamtali, et al. Cloud-to-ground lightning activity characteristics in Xinjiang during 2013—2016[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2018, 12(2): 43-49.]

[28] 王延慧, 张建涛, 叶文军, 等. 基于ArcGIS的新疆雷电灾害风险区划研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(6): 96-104. [Wang Yanhui, Zhang Jiantao, Ye Wenjun, et al. A study of lightning disaster risk zoning in Xinjiang based on ArcGIS[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(6): 96-104.]

[29] 李家启, 栾健, 王鹏, 等. 闪电定位资料质量控制中小幅值地闪范围的研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 727-731. [Li Jiaqi, Luan Jian, Wang Peng, et al. Study of the small amplitude cloud-to-ground lightning data in quality control of lightning location system [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 727-731.]

[30] 廖运建. 新疆年鉴[M]. 乌鲁木齐: 新疆年鉴社, 2018: 1-2. [Liao Yunjian. Xinjiang yearbook[M]. Urumqi: Xinjiang Yearbook Society, 2018: 1-2.]

[31] 高燚, 蒙小亮, 劳小青. 基于聚类分析的海南岛雷电灾害易损度风险区划[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 175-182. [Gao Yi, Meng Xiaoliang, Lao Xiaoqing. Cluster analysis-based vulnerability risk zoning of lightning disaster in Hainan Island[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1): 175-182.]

Characteristics of lightnings disasters in Xinjiang from 2005 to 2020

LIU Zhaoxu[1,2,3,4], LIU Jing[1,2,4], FAN Zi'ang[3]

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 2. Center for Central Asia Atmosphere Science Research, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Center for Xinjiang Lightning Protection and Disaster Reduction, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 4. National Observation and Research Station of Desert Meteorology, Taklimakan Desert of Xinjiang/Taklimakan Desert Meteorology Field Experiment Station of China Meteorological Administration/Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the statistical data related to lightning disasters from 2005 to 2020 and lightning location monitoring data in Xinjiang, China from 2013 to 2020, in this work, the characteristics of lightning disasters in Xinjiang were analyzed focusing on the industrial distribution, human casualties, and economic losses. The results showed: (1) There were 154 lightning disasters in Xinjiang from 2005 to 2020; these events resulted in 82 casualties. The annual variation in lightning disaster events showed a decrease across the studied period. Lightning disasters were more common in the period April-August, which is consistent with ground lightning activity in Xinjiang. (2) Lightning disasters were mainly concentrated in Altay Prefecture, the southeastern Tacheng Prefecture and Ili River Valley, whereas lightning disasters rarely occurred in southern Xinjiang. (3) Lightning disasters mainly occurred in rural areas, accounting for 62.3% of all disasters. The most common industrial damage caused by lighting disaster events was related to civil electronic equipment, factory equipment, electric power equipment, and buildings (in order of frequency). This study provides a theoretical foundation for lightning prevention and disaster reduction in Xinjiang.

Key words: lightning disaster events; spatial and temporal distribution; ground lighting activity; Xinjiang